发展太阳能和风能发电技术加速推进我国能源转型

李耀华　孔 力*
中国科学院电工研究所 北京 100190

摘要　我国地域广阔，太阳能和风能源资源十分丰富，足以满足我国社会生产生活等需求。经过几十年的发展，太阳能光伏发电、风力发电技术已趋于成熟。文章梳理了国内外太阳能和风能发电的产业、应用和成本的现状，指出太阳能和风能发电的规模迅速发展，发电量持续增长，已经成为全球重要的清洁电力能源；在技术进步和市场规模扩大的推动下，太阳能和风能发电的成本还将快速下降。因此，在可预见的将来，太阳能光伏发电和风力发电的技术和经济性都将达到与常规能源相当的水平，从而推动能源变革与转型的发展。

关键词　太阳能，风能，光伏发电，风力发电，能源转型

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.2019.04.007

进入21世纪以来，全球人口、经济持续增长，世界能源需求增长强劲，油气资源竞争激烈，生态环境压力增大，全球气候变化倍受关注；绿色低碳、可持续发展成为人类文明持续繁荣的科学理性选择。人类已经进入了知识网络时代，作为人类现代文明基石与动力的能源也正面临新的变革。能源领域具有投资大、周期长、关联多、惯性强的发展规律。能源既是经济资源，更是政治资源和战略资源，能源安全的问题受到国家高度重视。

未来二三十年，将是能源生产消费方式和能源结构调整变革的关键时期。人们将致力于构建绿色低碳、高效智能、多样共享的可持续能源体系。风力和太阳能等可再生能源将快速增长，从而形成天然气、石油、煤炭、核能、可再生能源为五大支柱的能源新格局。

我国地域广阔，太阳能和风能资源十分丰富且分布广泛，总量足以满足我国社会生产生活等需求。经过几十年的发展，目前太阳能光伏发电、风力发

*通讯作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（XDA21000000）
修改稿收到日期：2019年4月9日

电技术已趋于成熟，成本快速下降。在可预见的将来，太阳能光伏发电和风力发电的技术和经济性都将达到与常规能源相当的水平，推动能源变革与转型的发展。

1 太阳能和风能资源丰富，是未来可以信赖的能源

1.1 我国太阳能资源概况

我国太阳能资源丰富，达到我国陆地表面的太阳辐射的功率约为 1.68×10^3 TW，水平面平均辐照度约为 175 W/m^2，高于全球平均水平。而且，太阳辐射资源分布广泛，总体呈“西部高原大于中东部丘陵和平原、西部干燥区大于东部湿润区”的分布特点。根据年太阳总辐射量可划分为最丰富、很丰富、丰富和一般 4 个等级（表 1）。

2018 年，我国陆地表面平均年水平面总辐照量约为 1 486.5 kWh/m^2，固定式光伏发电年最佳斜面总辐照量约为 1 726.9 kWh/m^2 [1]。

1.2 我国风能资源概况

风能是由空气流动所产生的动能。根据国际上对风能资源技术开发量的评价指标，考虑了自然因素和政策因素的限制后，我国陆地 70 m 高度层年平均风功率密度达到 300 W/m^2 以上的风能资源技术可开发量为 2.6 TW，70 m 高度层年平均风功率密度达到 200 W/m^2 以上的风能资源技术可开发量为 3.6 TW（表 2）。广阔的海面也同样蕴藏着丰富的风能，在离岸距离不超过 50 km 的近海海域内，我国沿海水深不超过 50 m 的海上风力发电实际可装机容量约为 500 GW。

表 2　中国陆地不同高度风能资源可开发量

距离地面高度（m）	风功率密度 ≥300 W/m^2	
	技术可开发量（MW）	技术可开发面积（km^2）
50	202 393	55 5871
70	256 709	704 951
100	336 778	948 161

1.3 小结

总体看，我国绝大多数地区均属于适宜太阳能利用的地区，其中太阳能很丰富区（年辐射总量达到 1 400 kWh/m^2 以上）大约占国土面积的 2/3。我国各地区陆地风能资源分布虽然不均衡，但是每个省级行政区都有较为丰富的可开发利用的风能资源。

2 太阳能发电和风力发电已经成为全球重要的清洁电力来源

大力发展可再生能源已经成为世界各国应对全球气候变化的一项重要战略举措。我国近年来在风力发电和太阳能发电开发利用方面取得了显著成效，在产

表 1　中国太阳能资源的总量等级划分及相应区域

等级	年总辐射辐照量（MJ/m^2）	年总辐射辐照量（kWh/m^2）	年平均总辐射辐照度（W/m^2）	占国土面积（%）	主要分布地区
最丰富	≥6 300	≥1 750	≥200	约 22.8	内蒙古、甘肃、青海西部，西藏大部，新疆东部边缘地区，四川部分地区
很丰富	5 040—6 300	1 400—1 750	160—200	约 44.0	新疆、西北、华北大部，内蒙古东部，东北西部，山东东部，四川中西部，云南大部，海南
较丰富	3 780—5 040	1 050—1 400	120—160	约 29.8	内蒙古北部，东北中东部，华北部分地区，华中、华东、华南大部
一般	<3 780	<1 050	<120	约 3.4	四川盆地及周边地区（包括四川东部、重庆大部、贵州中北部、湖北西部、湖南西北部）

业发展、技术创新等方面取得了突出成果。风电已成为我国第三大电源，而光伏电池及相关产业的发展规模已经占据全球前列。可再生能源正在逐步从零散、小规模的能源发展成为可部分替代化石燃料、缓解生态环境承载压力、实现大规模利用的重要能源形式。

2.1 世界范围内可再生能源发电量持续增长

图 1 显示了 2010—2017 年全球可再生能源发电量占总发电量的增长情况。可以看到，截至 2017 年底，全世界可再生能源发电量已经占到全部发电量的 26.5%，其中水力发电的占比基本保持不变，而非水可再生能源发电量（主要是风力发电和光伏发电）已经从 2010 年的 3.3% 增长到了 2017 年的 10.1%。

2.2 我国太阳能光伏发电产业领跑世界

近 10 年来，全球太阳能光伏发电呈现出强劲的发展势头，太阳电池装机容量连续多年保持了 30% 以上的增长率（图 2）。我国光伏发电相关产业的发展在世界上尤其突出，产业规模多年保持世界第一，2017 年我国光伏发电量大体占全球光伏发电量的 1/4（图 3）。2018 年全年，中国新增太阳能光伏装机容量为 43 GW；截至 2018 年底，我国累计光伏装机量已超过 170 GW。即使在海外“双反”以及国内支持政策调整的不利情况下，2018 年我国光伏制造业仍取得较大发展：多晶硅产量达到 25 万吨，同比增长 3.3%；硅片产量达到 109.2 GW，同比增长 19.1%；电池片产量达到 87.2 GW，同比增长 21.1%；组件产量达到 85.7 GW，同比增长 14.3%。2018 年全年我国光伏电池组件出口 41 GW，同比增长 30%，光伏产品出口额达到 161.1 亿美元，为 20 多个国家实现光伏平价上网提供支撑，这为全球应对气候变化作出了重要贡献[2]。

2.3 我国风力发电保持持续稳定发展

近 10 年全球风力发电装机容量增长情况如图 4 所示。风力发电增长势头虽然不如光伏发电，但每年仍然保持着 10%—16% 的增长率，而且总装机容量和发电量均大于光伏发电（图 5）。从“十二五”到“十三五”的 10 年间，我国风力发电年增长规模持续保持在 20 GW 左右。据中国风能协会初步统计数据：截至 2018 年底，我国风力发电新增并网容量 21.14 GW，累计并网 210 GW。2018 年全年风力发电上网发电量达到 35.7 TWh，占全部发电量的 5.2%；全年风力发电机组利用小时数 2 103 h，同比增加 153 h；2018 年，我国海上风力发电新增装机容

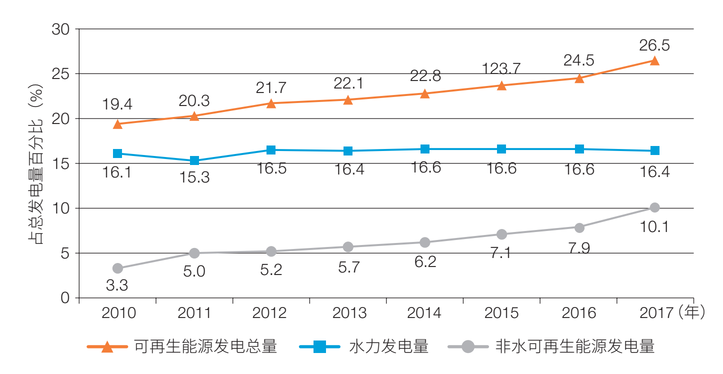


图 1 2010—2017 年全球可再生能源发电量占总发电量比情况

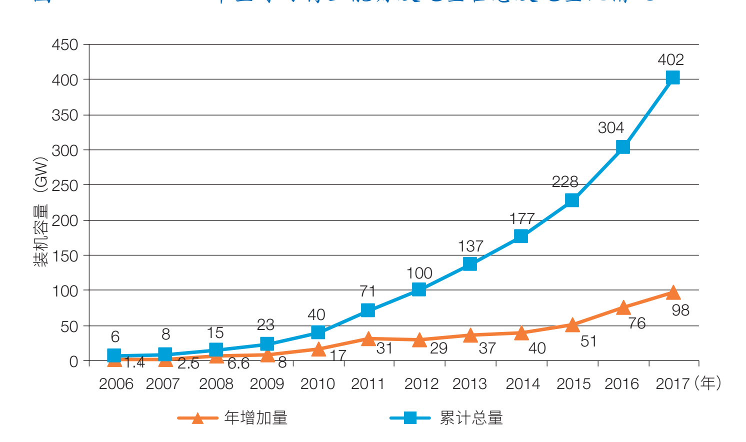


图 2 2006—2017 年全球光伏发电装机容量

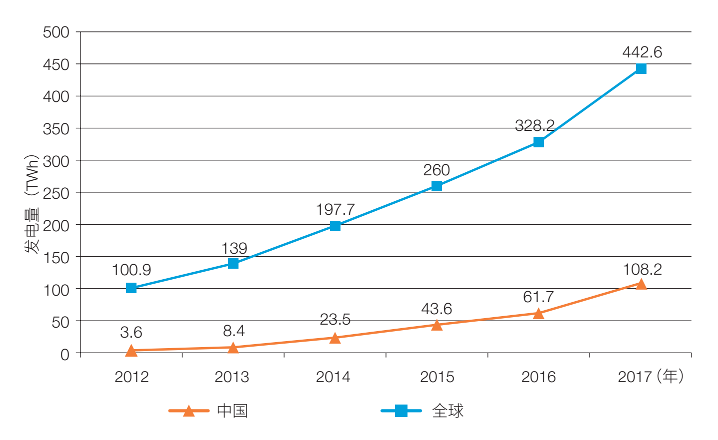


图 3 2012—2017 年中国及全球太阳能发电量

量 1.66 GW，累计装机容量达到 4.45 GW [3]。

3 技术进步是推动太阳能发电和风能发电发展的根本动力

多年来，国家科技计划对可再生能源科技研发持续给予支持，国内一些有实力的企业也加大了对科技研发的投入。这些投入在不断提高我国太阳能发电、风能发电相关技术能力，以及提升国内企业的技术水平方面发挥了重要作用，促进了我国太阳能发电和风能发电全行业的发展。

（1）太阳能光伏发电方面。我国已经形成了硅材料、硅片、电池、组件为核心的晶体硅太阳能电池产业化技术体系，掌握了效率 20% 以上的背钝化电池、选择性发射极电池、全背结电池、金属穿孔卷绕（MWT）电池等高效晶体硅太阳能电池制备及工艺技术。批量化单晶硅电池效率超过了 22%，实验室最高效率达到了 24.1%。批量生产多晶硅电池效率 18.5%，多晶硅电池实验室效率达到 21.25%，创造了多晶硅太阳能电池效率的世界纪录。通过并购和国际合作使得我国硅基、CdTe、CIGS 等薄膜电池的研究和技术水平快速提升。目前我国逆变器等平衡部件技术水平与国际接轨，系统集成智能化技术仍有待提升。面向光伏发电规模化利用，我国光伏系统关键技术取得多项重大突破：掌握了 100 MW 级并网光伏电站设计集成技术，掌握了 MW 级光伏与建筑结合系统设计集成技术，掌握了 10—100 MW 级水/光/柴/储多能互补微电网设计集成技术并开展了示范。

（2）风力发电方面。我国打破国外垄断，实现了风电机组整机由 100 kW 级向 MW 级跨越式发展，已经成为世界风电设备制造大国；形成 3.6 MW 以下装备设计制造技术体系，初步掌握了 5 MW、6 MW 整机集成技术；风电机组整机及零部件国产化率达到 85% 以上。我国突破了大规模风电发展并网接入的技术障碍，解决了大规模风电并网特性的仿真模拟难题，开

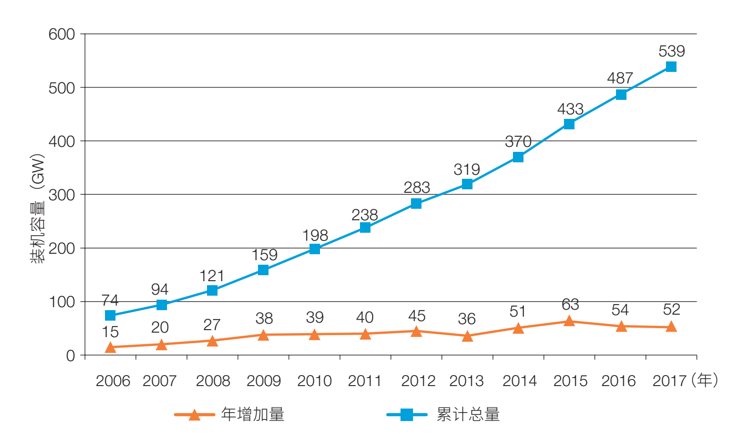


图 4　2006—2017 年全球风力发电装机容量

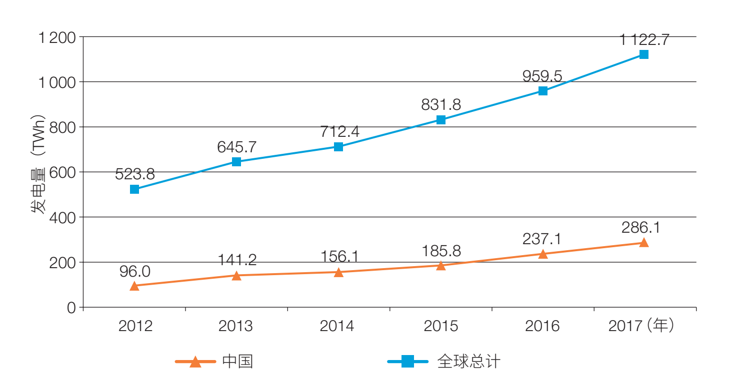


图 5　2012—2017 年中国及全球风力发电量

发了具有完全自主知识产权的风电功率预测系统。基本解决了低/高电压穿越技术难题，建成了全球首个 100 MW 级国家风光储输示范工程和全球首个海岛风电多端柔性高压直流输电（VSC-HVDC）示范工程，实现了大规模风电高渗透率并网运行。

技术进步使得中国太阳能光伏发电和风能发电技术水平不断提高，产业规模迅速扩大，在国际市场上的竞争力也不断增强。目前在世界排名前 10 位的光伏电池生产企业中，中国企业占据 8 席（含中国台湾企业），中国大陆企业光伏组件产量占全世界的 72% 以上。在世界排名前 10 位的风力发电设备制造商中，中国企业占据 3 席（产值第 3、6、8 名）；中国风机制造商占全球份额的 21.2%。科技进步和良好的经营管理模式帮助中国太阳能和风能发电企业在国际竞争中建立了不可动摇的竞争优势。

4 光伏发电和风力发电成本持续下降，即将进入平价上网时代

在以往相当一段时间，可再生能源发电技术的电价成本远高于常规发电成本，使得可再生能源发电技术在经济性上完全无法同以燃煤发电为代表的常规能源竞争，而只能作为一种补充能源在偏远地区获得部分应用。

经过几十年的研究发展，这种状况正在发生着令人瞩目的变化。近10年来，在技术进步和市场规模化发展的双重推动下，全球太阳能光伏发电和风力发电的成本快速下降，导致全球光伏发电最低电价不断下降（图6）。过去10年，我国太阳能光伏电池组件和发电系统的成本均下降了90%，即成本只有原来的1/10（图7）。随着单机规模的增加，风力发电机组的单位成本也不断下降，陆上风电上网电价降至0.49—0.61元/kWh。风电已成为我国第三大电源。

光伏发电和风力发电的电价成本除了设备投资以外，项目所处的局部资源条件和运行环境都是影响最终电价的重要因素。目前从全球范围来看，一些资源条件和运行环境好的项目，其单位电价成本已经达到或低于常规能源电价水平，可以实现平价上网（图8）。国内在表1所示资源条件很好的第一类和第二类地区建设的集中式地面光伏电站，如果能将弃光控制在比较低的水平，则可以做到电网侧平价上网。风力发电的情况也类似，即以目前的技术发展水平，可以在一些条件好的风电场实现电网侧平价上网。目前国家能源局已经在推动一些光伏发电和风力发电的平价上网示范项目。如果能在放开电力市场方面取得更多突破，今后可能会有更多光伏发电从用户侧接入电网，将会有更多地区的分布式电站可以实现用户侧平价上网。

近年来，国际社会开始深入探讨可再生能源的长期未来发展情景和路径。欧盟《2050年能源路线图》提出到2050年可再生能源将占到全部能源消费的55%以上；德国《能源方案》提出到2050年可再生能源占能源消费总量的60%和电力消费的80%；英国能源与气候变化部在《2050年能源气候发展路径分析》中探讨了远期可再生能源满足约60%能源需求的前景；美国能源部支持完成的《可再生能源电力未来研究》认为可再生能源可满足2050年80%的电力需求[4,5]；日本在2011年福岛核电事故后确定2020年可再生能源将满足20%电力需求的目标，并深入探讨2030年提高可再生能源的能源转型方案；联合国政府间气候变化

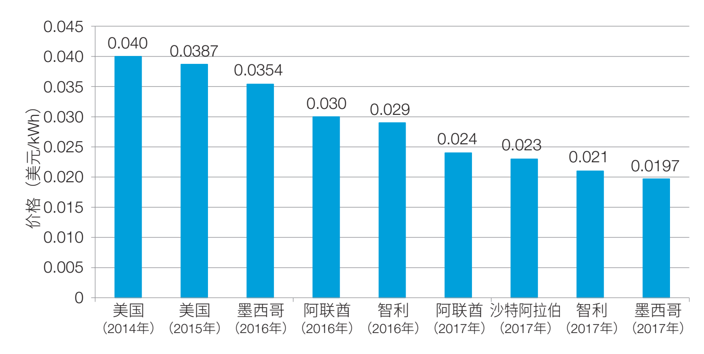


图6 部分国家光伏发电价格

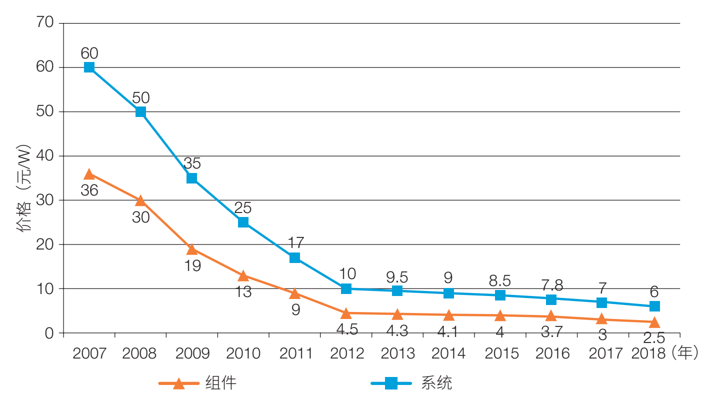


图7 2007—2018年中国光伏组件和系统价格下降情况

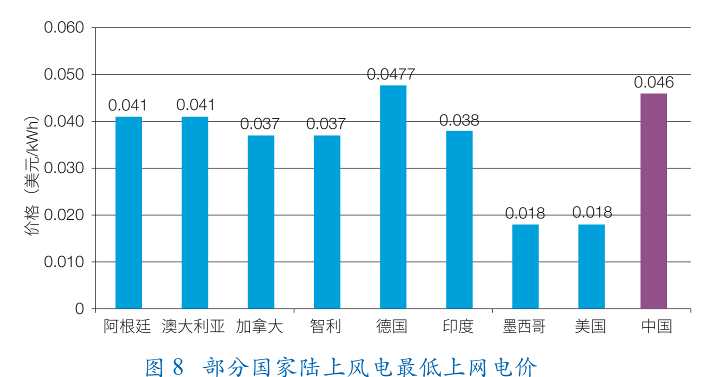


图8 部分国家陆上风电最低上网电价

图中电价，中国为2018年电价，其余国家为2017年电价

专门委员会（IPCC）的《可再生能源与减缓气候变化特别报告》（*SRREN*）的最高情景认为2050年可再生能源将可满足77%的能源需求[6,7]。尽管世界各国根据本国的实际情况对未来能源发展的前景做出的判断和规划不完全相同，但总的趋势是一致的。当太阳能和风能发电的技术和可靠性得到充分验证，当其发电的成本不断下降最终能够达到甚至低于常规能源发电成本时，可再生能源将在未来能源发展中占据重要的地位，成为未来的主力能源。

5 加强科技创新，促进太阳能和风能发电技术真正成为未来主力能源

近10年来，不管是国际还是国内，太阳能光伏发电和风力发电技术都取得了飞跃发展，但太阳能和风能要真正成为全社会可以依赖的重要能源还有相当长的路程。太阳能和风能除了具有资源丰富、清洁、环境友好等优点外，也都具有能量密度较低以及具有一定的间歇性和波动性等缺点。因而不管从科技创新和技术发展，还是能源政策环境等方面而言，发展太阳能和风能发电都还面临许多艰巨的任务。除光伏发电技术和风力发电技术本身以外，多能互补技术、储能技术、智能电网技术的发展也有助于克服太阳能和风能间歇性和波动性的缺点，促进太阳能和风能发电技术的发展与大规模应用。

（1）太阳能光伏发电技术方面。太阳能电池技术及系统设备将沿着高能效、低成本、长寿命、智能化的技术方向发展。国家研发重点计划应持续支持高效率晶体硅太阳能电池、薄膜电池产业化技术研发，新型太阳能电池关键技术攻关和产业化研发；支持光伏系统及平衡部件技术创新和水平提升；大力推动面向全行业的公共研究测试平台建设。

（2）风力发电技术方面。未来，风电机组单机容量将持续增大，大型风机柔性叶片技术及机组的核心控制技术亟待发展；双馈异步发电技术仍将占主流地位，直驱式、全功率变流技术在更大规模风电机组上应用的比例越来越大，有望成为未来主流技术；各种增速型全功率变流风电机组将得到应用；低风速地区风电设备研发将取得进展；风电场建设和运营的技术水平将日益提高；海上风电技术将成为重要发展方向。

（3）储能技术方面。着力研究大容量和大功率储能技术，提高效率，实现储能技术在规模、寿命和成本上的跨越。在可再生能源大规模接入、传统电力系统调峰提效和区域供能方面，完成具有完全自主知识产权、对国际储能技术与产业发展具有指导意义的系统解决方案和示范工程，形成一套完整的技术攻关、技术示范以及工程应用的储能技术研发体系。

（4）多能互补及分布式能源技术方面。未来发展方向为：多种可再生能源的互补利用及其与常规能源形式的综合高效利用；可再生能源高比例消纳和外送的系列关键技术研究，建立不同气候、不同用能需求的可再生能源供能系统示范，以及以可再生能源为主的能源系统的省区级/市级研究和示范。

（5）智能电网技术方面。大力发展大容量远距离输电和智能微网技术，满足我国大规模集中式可再生能源发电和分布式利用两种需要；开发多种电压等级、交直流多种形式的接入技术和设备，方便可再生能源的接入。提高可再生能源的消纳能力，全面保障电网在大量接入可再生能源后的安全稳定运行。大力发展智能配用电技术，提高智能化水平，包括电动汽车充换电技术、智能用电技术等，打造未来我国清洁、高效、智能化能源电力系统。

参考文献

1 中国气象局风能太阳能资源中心. 中国风能太阳能资源年景公报2018. [2019-01-21]. http://news.bjx.com.cn/html/20190121/957827.shtml.

2 王勃华. 中国光伏产业发展现状与展望. 电力设备管理, 2019, (2): 27.

3 中国可再生能源学会风能专委会. 2018年中国风电吊装容量统计简报. [2019-04-07]. http://www.escn.com.cn/news/show-725537.html.
4 IEA. Trends in PV Applications-2015. [2015-12-25]. http://www.iea-pvps.org/.
5 中丹可再生能源发展项目管理办公室. 中国可再生能源发展路线图2050. [2016-01-12]. http://www.cspplaza.com/article-4436-html.
6 国家发改委能源研究所. 中国风电发展路线图2050. [2016-01-12]. http://www.fenglifadian.com/news/china/33489BB97.html.
7 中国工程院. 中国能源中长期（2030、2050）发展战略研究报告. 北京:科学出版社, 2011.

Developing Solar and Wind Power Generation Technology to Accelerate China's Energy Transformation

LI Yaohua　KONG Li*
(Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract　China has a vast geographical area and abundant solar energy and wind energy resources, which are sufficient to meet the needs of China's social production and life. After decades of development, solar photovoltaic power generation and wind power generation technologies have matured, the scale of industries and applications has developed rapidly, and power generation has continued to grow. It has become an important clean power source in the world. The cost of solar and wind power generation is rapidly declining, driven by technological advances and the expansion of the market, and in the foreseeable future solar photovoltaic and wind power generation will be technically and economically equivalent to conventional energy sources, that will promote energy transformation.

Keywords　solar energy, wind energy, photovoltaic power generation, wind power generation, energy transformation



李耀华　中国科学院电工研究所所长，研究员。长期从事电力电子与电力传动技术研究，主要研究领域有大功率电力电子技术、可再生能源电力变换技术、大功率直线电机及驱动技术等。E-mail: yhli@mail.iee.ac.cn

LI Yaohua　Director and Professor of Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences (CAS). He has long been engaged in the research of high capacity power electronics, power conversion for renewable energy, high power linear motor and drive technology. E-mail: yhli@mail.iee.ac.cn

*Corresponding author



孔 力　中国科学院电工研究所研究员，电网技术实验室主任。长期从事可再生能源发电、微网与智能电网技术研究。主要研究领域有太阳能光伏发电系统、可再生能源与电力系统、交直流混合微电网技术等。E-mail: kongli@mail.iee.ac.cn

KONG Li　Professor of Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences (CAS), Director of Laboratory of Power System Technology. He has long been engaged in the research of renewable energy and power generation, microgrid and smart grid technology. His main research includes solar energy photovoltaic power generation, renewable energy and power system, DC-AC hybrid micro power grid technology, etc. E-mail: kongli@mail.iee.ac.cn

■责任编辑：文彦杰

参考文献（双语版）

1 中国气象局风能太阳能资源中心. 中国风能太阳能资源年景公报2018. [2019-01-21]. http://news.bjx.com.cn/html/20190121/957827.shtml.

CMA Wind and Solar Energy Resources Center. Annual bulletin of China's wind energy and solar energy resources 2018. [2019-01-21]. http://news.bjx.com.cn/html/20190121/957827.shtml. (in Chinese)

2 王勃华. 中国光伏产业发展现状与展望. 电力设备管理, 2019, (2): 27.

Wang B H. Present situation and prospect of photovoltaic industry development in China. Electric Power Equipment Management, 2019, (2): 27. (in Chinese)

3 中国可再生能源学会风能专委会. 2018年中国风电吊装容量统计简报. [2019-04-07]. http://www.escn.com.cn/news/show-725537.html.

Chinese Wind Energy Association. Statistical briefing on hoisting capacity of wind power in China in 2018. [2019-04-07]. http://www.escn.com.cn/news/show-725537.html. (in Chinese)

4 IEA. Trends in PV Applications-2015. [2015-12-25]. http://www.iea-pvps.org/.

5 中丹可再生能源发展项目管理办公室. 中国可再生能源发展路线图2050. [2016-01-12]. http://www.cspplaza.com/article-4436-html.

China-Denmark Renewable Energy Development Project Office. China renewable energy development roadmap 2050. [2016-01-12]. http://www.cspplaza.com/article-4436-html. (in Chinese)

6 国家发改委能源研究所. 中国风电发展路线图2050. [2016-01-12]. http://www.fenglifadian.com/news/china/33489BB97.html.

Energy Research Institute of National Development and Reform Commission. China wind energy development roadmap 2050. [2016-01-12]. http://www.fenglifadian.com/news/china/33489BB97.html. (in Chinese)

7 中国工程院. 中国能源中长期（2030、2050）发展战略研究报告. 北京: 科学出版社, 2011.

Chinese Academy of Engineering. Research Report on China's Medium and Long Term Energy Development Strategy (2030, 2050). Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)